

Si含有DLC被膜のトライボロジー特性の解明と四輪 駆動車用電磁クラッチへの応用に関する研究

著者	安藤 淳二
号	52
学位授与番号	3911
URL	http://hdl.handle.net/10097/37627

氏 名	あん どう じゅん じ 安 藤 淳 二
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成20年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械システムデザイン工学専攻
学 位 論 文 題 目	Si 含有 DLC 被膜のトライボロジー特性の解明と 四輪駆動車用電磁クラッチへの応用に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 堀切川 一男
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 堀切川 一男 東北大学教授 井上 克己 東北大学教授 厨川 常元 東北大学准教授 山中 将

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒論

近年, 四輪駆動 (4WD: Four Wheel Drive) 車用の電子制御カップリングにおいては, 大型車両への展開や小型化による負荷増加に対応するため, 電磁クラッチしゅう動部材の耐久性向上をめざす新たな研究開発が必要となっている。電磁クラッチの表面処理は従来, 特殊ガス軟窒化を採用してきたが, 更なる小型・高容量・低コスト化に対して対応が困難となっている。そこで本研究では, 高い密着力が得られ, 膜のつきまわり性に優れる方法として期待される, 直流方式のプラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) 法による Si 含有 DLC 被膜 (以降 DLC-Si: Si containing Diamond-Like Carbon と称す) に着目した。電磁クラッチへの被膜に要求される性能としては, 潤滑油下において, (1) 摩擦係数が高いこと, (2) 摩擦係数(μ)がすべり速度(v)に対して正勾配を有すること (μ - v 正勾配), (3) 被膜の密着力が高いこと, (4) 耐摩耗性に優れること, (5) 相手攻撃性が低いこと, (6) 量産性に優れることなどが挙げられる。

一方, 4WD カップリングの潤滑油は, 従来 ATF (Automatic Transmission Fluid) を流用してきたが, 上述した要求を満たす為には, 専用潤滑油の開発が必要となっている。

以上のような背景のもとで, 本論文では, 駆動系潤滑油中における Si 含有 DLC 被膜の摩擦・摩耗特性を体系的に明らかにした上で, Si 含有 DLC 被膜をしゅう動部材に用いた電磁クラッチを開発する。さらに, 耐久性に優れる 4WD 車用の電子制御カップリング専用の潤滑油を開発し, 最終的に小型かつ高容量の 4WD 電子制御カップリングの実用化を達成する。

第2章 ATF 潤滑下における各種硬質被膜の摩擦摩耗特性の解明

第2章では, ATF 潤滑下における DLC-Si 被膜の摩擦・摩耗特性を明らかにした。DLC-Si 被膜は, 自身のしゅう動面の粗さを維持し, 同時に極めて低い相手攻撃性を示すことにより, 摩擦初期の境界潤滑状態を維持し, 駆動力伝達装置に要求される十分に高い摩擦係数で, かつ摩擦係数が正のすべり速度依存性を発現することを見出した (図1)。

さらに, しゅう動面の TOF-SIMS (Time of flight secondary ion mass spectrometry) 分析により, DLC-Si 被膜が

ATF 潤滑下において良好なトライボロジー特性を発現するメカニズムとして、DLC-Si 被膜と相手材しゅう動面へのコハク酸イミド系分散剤などの添加剤吸着膜が関与していることが明らかになった (図 1)。

第 3 章 ATF 潤滑下の摩擦における各種硬質被膜の損傷形態の評価

第 3 章では、ATF 潤滑下における DLC-Si 被膜の耐摩耗性、耐剥離性などの表面損傷形態を繰り返し摩擦にて評価し、膜損傷の発生条件および評価手法の有効性を明らかにした。

本試験法による他種膜との比較において、DLC-Si 被膜は最も高い信頼性を得た。高密着化処理を施した DLC-Si 被膜は、他の硬質被膜よりも摩擦繰り返し数 1 回における臨界荷重 W_{c1} が高く、高荷重域においても被膜の損傷は、生じにくいことが分かった。

また、ボール試験片と硬質膜を介した基材の動的接触を考慮した接触形態では、ヘルツ最大接触圧力 P_{max} と基材のビッカース硬さ $Hv_{substrate}$ の比で表される無次元接触圧力 $P_{max}/Hv_{substrate}$ と摩擦係数によって分類され、ヘルツクラック、スポーリングおよびシビア摩耗は、全て基材の塑性接触域で起きていることが分かった。

さらに、摩擦繰り返し数 1 回に膜損傷が生じるのは、無次元接触圧力 $P_{max}/Hv_{substrate}$ がおよそ 2.4 以上の極めて過酷な接触領域であることが分かった (図 2)。

また、すべり摩擦下における接触の過酷さを表す新しい無次元パラメータ Ss (Severity of spalling) を導入した。 Ss は、それぞれの実験条件における無次元接触圧力と、基材が弾塑性接触を開始する臨界無次元接触圧力との比である。本実験で得られた各種硬質被膜のスポーリング発生条件を、 Ss を用いて評価した結果、 Ss 値がおよそ 3.6 以上でスポーリングが発生することが明らかとなった (図 2)。

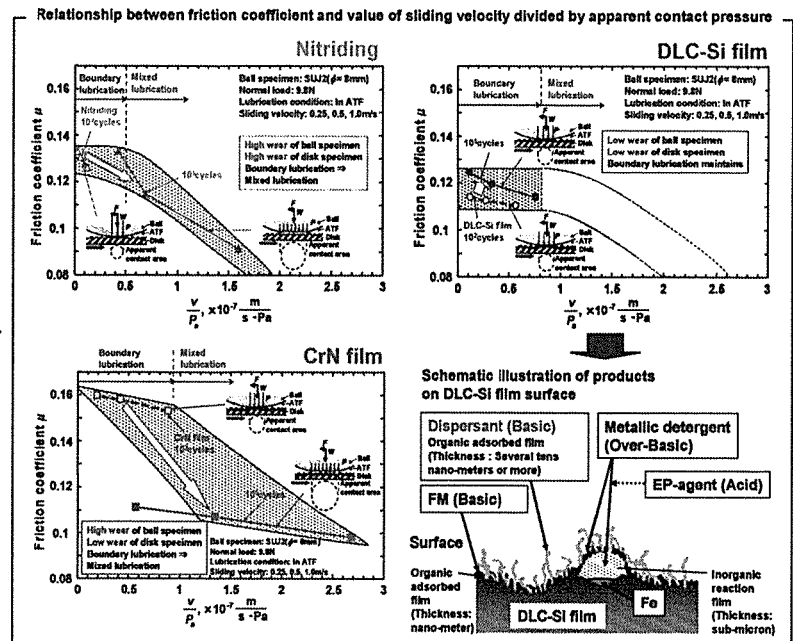


図 1 DLC-Si 被膜の潤滑状態およびしゅう動面への添加剤の吸着挙動

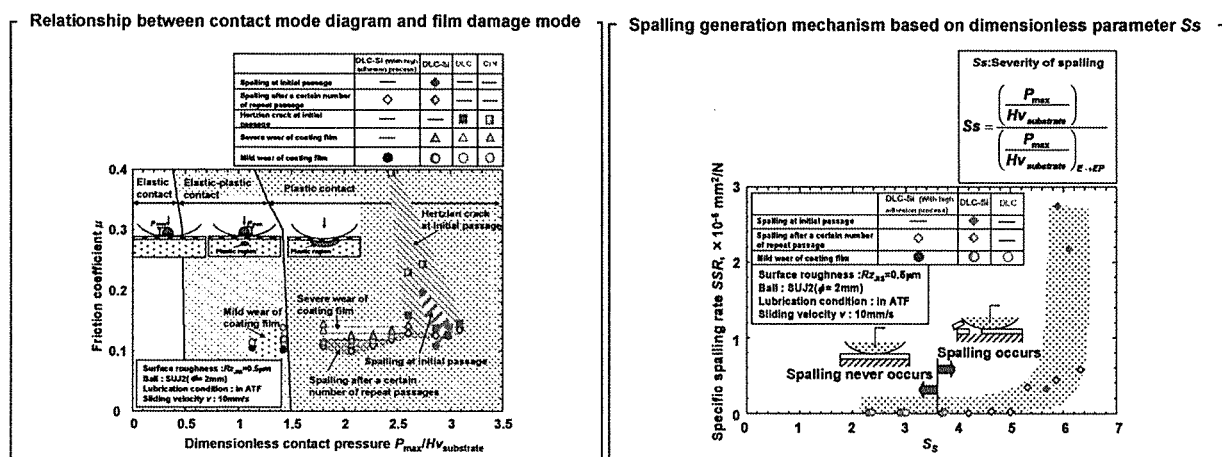


図 2 DLC-Si 被膜の表面損傷の発生条件とその機構

第4章 しゅう動面粗さおよび形状が及ぼす Si 含有 DLC 被覆電磁クラッチの摩擦特性の解明

第4章では、電磁クラッチにおけるしゅう動面の粗さや形状が摩擦特性に及ぼす影響について、混合潤滑モデルを用いて机上解析することで、 μ - v 正勾配を発現し得る、しゅう動面粗さおよび形状指針を提案した。

電磁クラッチの摩擦特性を机上計算するため、摩擦面形状を円周・半径方向ともに考慮できるようなオイル流れ解析を実施し、計算値が実測値の傾向をシミュレートできることを明らかにした(図3)。

さらに、 μ - v 特性に優れる電磁クラッチのしゅう動面の設計指針として、DLC-Si 被覆アウトプレート表面粗さは $R_{z118}=3 \sim 5\mu\text{m}$ 、インナプレートにおいては、深さ $10\mu\text{m}$ 、ピッチ $100\mu\text{m}$ 程度の微細油溝構造が有効であることを見出した。

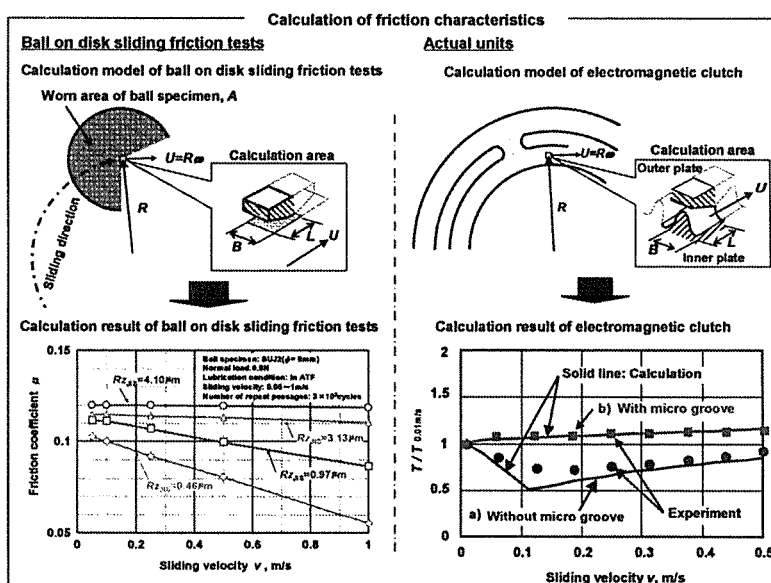


図3 しゅう動面粗さおよび形状が及ぼすDLC-Si被膜の摩擦特性

第5章 Si 含有 DLC 被覆電磁クラッチの摩擦特性に及ぼす潤滑油添加剤の影響

第5章では、4WD カップリングのシャダー発生メカニズムを解析し、さらに潤滑油添加剤の電磁クラッチへの吸着挙動を明らかにすることで、耐シャダー寿命向上のための指針を提案した。

潤滑油の劣化メカニズムとして、コハク酸イミド系分散剤等の重要添加剤の分解、変質は潤滑油中の活性な Fe 摩耗粉により促進されることなどの知見を得た(図4)。また、DLC-Si 被膜を電磁クラッチに応用することで、Fe 摩耗粉の発生を抑制し、潤滑油の耐シャダー寿命を向上させることが可能となった。

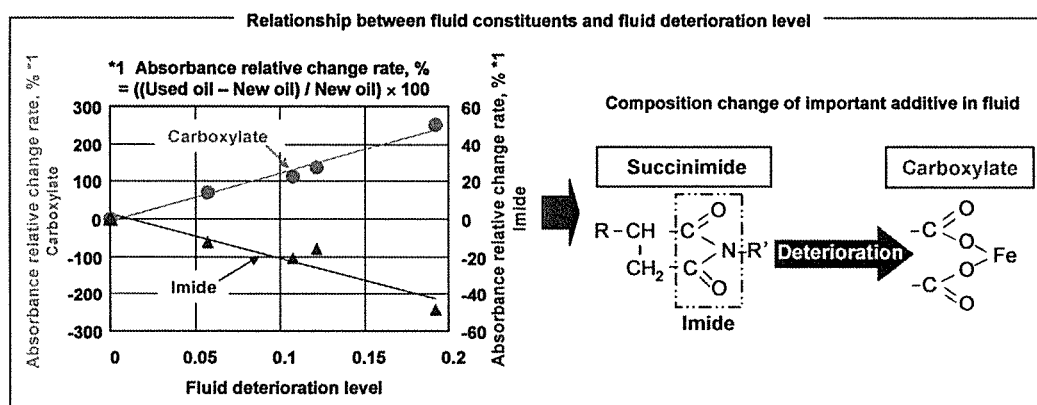


図4 潤滑油の組成変化に着目したシャダー発生メカニズム

第6章 4WD カップリング専用潤滑油の開発

第6章では、第5章の結果に基づいた Fe 摩耗の抑制に優れた潤滑油添加剤の処方や、低温粘度特性に優れた合成油の採用により、4WD カップリングの性能を画期的に向上させた専用潤滑油を開発した。

シャダー防止作用に有効である添加剤の処方として、P 系極圧剤、Ca 系金属清浄剤、コハク酸イミド系無灰分散剤、アミン系 FM 剤の増量および配合の有効性を確認した。

さらに、極低温域の潤滑油粘度の低減においては、合成系基油を最適化することにより達成した。

以上の研究開発により、専用潤滑油は、4WD カップリングの耐シャダー寿命を画期的に向上させつつ、極低温域のひきずりトルクを低減させた（図5）。

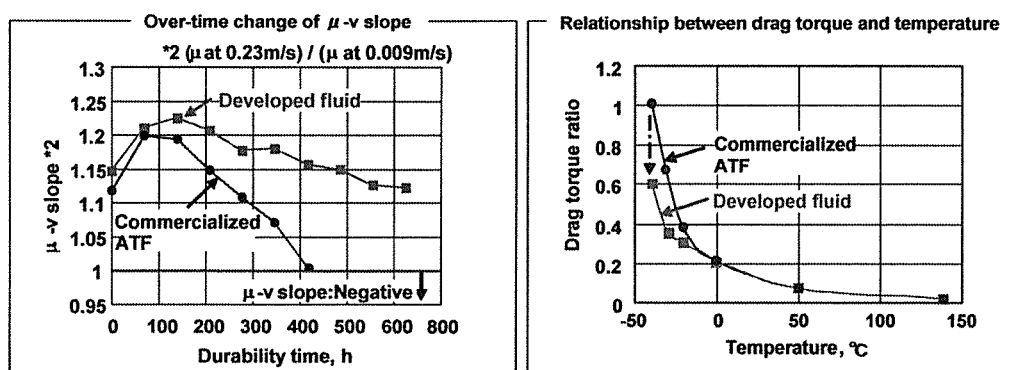


図5 4WDカップリング専用潤滑油と市販ATFの実機耐シャダー寿命およびひきずりトルク性能の比較

第7章 Si 含有 DLC 被覆電磁クラッチを用いた小型・高容量 4WD カップリングの開発

第7章では、DLC-Si 被覆電磁クラッチのトライボロジー特性を解明し、かつ直流プラズマ CVD 法による DLC-Si 被膜の大量処理技術を開発することに成功し、4WD カップリングの小型・高容量・低コスト化を達成させた。

DLC-Si 被膜は、駆動系潤滑油中においては、動力伝達装置に要求される十分に高い摩擦係数であることを見出し、しゅう動面微細粗さの確保による境界摩擦の維持や、添加剤吸着膜の効果により、耐振性に優れた高容量な電磁クラッチを開発した。これにより、電磁クラッチの耐久性が8倍以上向上し、これまで不可能であったクラッチ枚数の削減を実現させ、4WD カップリングの小型・高容量・低コスト化を達成した（図6）。

一方、開発した直流プラズマ CVD 法による DLC-Si 被膜の大量生産技術は、電磁クラッチを高密度に装填し、最適処理条件を見出すことで、膜厚や膜質の均一性に優れた高性能な DLC-Si 被膜を大量成膜することに成功し、DLC-Si 処理の低コスト化を達成した（図6）。

これらの研究開発により、DLC-Si 被覆電磁クラッチを応用した 4WD カップリングは、従来適用が容易でなかった 3000cc を超えるクラスを含めた幅広い車種への搭載を実現している。

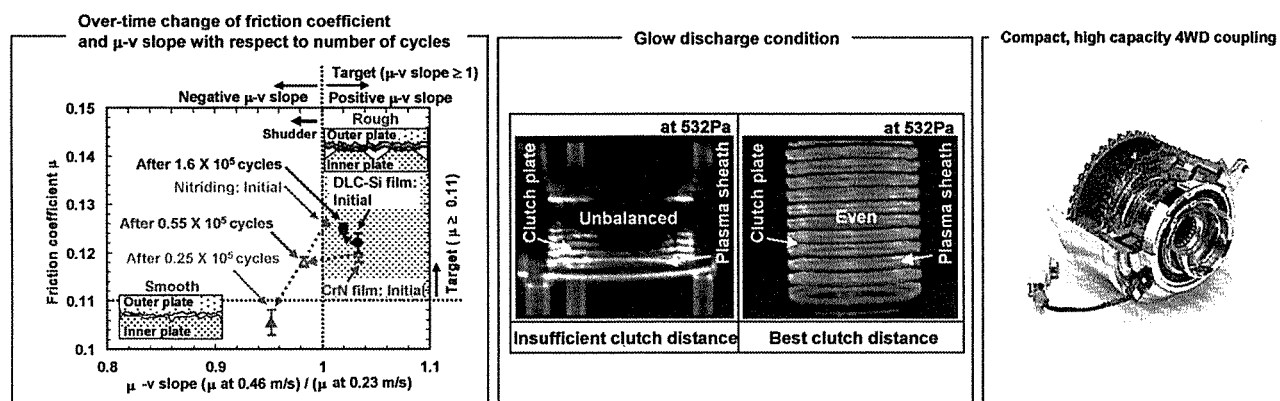


図6 DLC-Si被覆電磁クラッチを用いた小型・高容量4WDカップリングのトライボロジー特性と外観写真

第8章 結論

本章では、第2章から第7章までに得られた主な知見を示し、本研究の総括を行った。

論文審査結果の要旨

近年、四輪駆動車用の電子制御カップリングにおいては、大型車両への展開や小型化による負荷増加に対応するため、電磁クラッチしゅう動部材の耐久性向上をめざす新たな研究開発が必要となっている。本研究は、駆動系潤滑油中における Si 含有 DLC 被膜の摩擦・摩耗特性を体系的に明らかにした上で、世界で初めて Si 含有 DLC 被膜をしゅう動部材に用いた電磁クラッチの開発に成功したものである。さらに、耐久性に優れる四輪駆動車用の電子制御カップリング専用の潤滑油を開発し、最終的に小型かつ高容量の四輪駆動車用の電子制御カップリングの実用化を達成したものである。本論文は、これらの研究成果についてまとめたものであり、全編 8 章からなる。

第 1 章は、緒論であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第 2 章では、Si 含有 DLC 被膜が、駆動系潤滑油中において駆動力伝達装置に要求される十分に高い摩擦係数を示し、かつ摩擦係数が正のすべり速度依存性を発現することを明らかにしている。これらは、小型かつ高容量の電磁クラッチの開発のための基盤となるものであり、極めて重要かつ有用な知見である。

第 3 章では、駆動系潤滑油中の摩擦における Si 含有 DLC 被膜の表面損傷形態の発生機構を、体系的に明らかにしている。これは、Si 含有 DLC 被膜を電磁クラッチのしゅう動部材へ応用する上で極めて有益な知見である。

第 4 章では、駆動系潤滑油中の摩擦・摩耗特性に及ぼす Si 含有 DLC 被覆電磁クラッチのしゅう動面の表面粗さおよび微細形状の影響を明らかにしている。さらに、油圧反力解析を行い、摩擦係数のすべり速度依存性に関する計算結果が実測値と極めて良く一致することを明らかにしている。これらの結果に基づき、小型かつ高容量の電磁クラッチしゅう動面の設計指針を提案している。これは、電磁クラッチのしゅう動面の有効な設計基盤となるものであり、実用上極めて有益な成果である。

第 5 章では、コハク酸イミド系分散剤を潤滑油に添加することにより、電磁クラッチしゅう動部材の寿命が向上することを明らかにしている。これは、四輪駆動車用の電子制御カップリング専用の潤滑油を開発する上で極めて有用な知見である。

第 6 章では、四輪駆動車用の電子制御カップリング専用の潤滑油の開発の概要について述べている。この潤滑油を用いることにより、潤滑油の寿命を 1.5 倍以上に向上させることが可能であることを明らかにしている。これらは、すでに実用化されている重要な成果である。

第 7 章は、Si 含有 DLC 被膜をしゅう動部材に用いた電磁クラッチのトライボロジー特性を解明している。この Si 含有 DLC 被膜を電磁クラッチに応用することで電磁クラッチの寿命を 8 倍以上に向上させることが可能であることを明らかにし、四輪駆動車用の電子制御カップリングの小型かつ高容量化を達成させている。さらに、直流プラズマ CVD 法による Si 含有 DLC 被膜の大量処理技術を開発することに成功している。これらは、すでに実用化されている重要な成果である。

第 8 章は、結論である。

以上要するに本論文は、Si 含有 DLC 被膜のトライボロジー特性を解明し、Si 含有 DLC 被膜を用いた小型かつ高容量の電磁クラッチならびに四輪駆動車用の電子制御カップリング専用の潤滑油を開発したものであり、機械システムデザイン工学ならびにトライボロジーの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。